

Trabajo Fin de Grado

Reconstrucción de variables climáticas a partir del crecimiento radial de *Pinus halepensis* Mill en el Parque Natural de las Bardenas Reales de Navarra.

Reconstruction of climatic variables from the radial growth of *Pinus halepensis* Mill in the Bardenas Reales Natural Park of Navarra.

Autora

Judit Padilla Alberola

Director

Miguel Ángel Saz Sánchez

Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza.
Curso 2019-2020.

AGRADECIMIENTOS

Todo este largo camino, fruto de esfuerzo y dedicación, no hubiera sido posible sin el apoyo de esas personas, amigos, compañeros y familia que han estado día tras día apoyándome en los momentos más difíciles. Para todos ell@s.

De una manera más exhaustiva, a mi director, Miguel Ángel Saz, por darme esta oportunidad de realizar el trabajo de fin de grado sobre reconstrucciones climáticas, mi objetivo desde el primer curso. Por enseñarme desde el minuto cero todo lo que sé sobre la dendrocronología, cultivando cada uno de mis pensamientos y mis conocimientos desde el primer curso, por llenarme de ilusión y, sobre todo, por enseñar, de verdad, la esencia de lo que es, a día de hoy, la Geografía.

Mil y una historias, anécdotas y momentos de campo.

También agradecer al grupo de Clima, Agua, Cambio Global y Sistemas Naturales por dejarme formar parte de los muestreos en salidas de campo, y de la ayuda que me han proporcionado con el tratamiento de los datos en este trabajo final de Grado, gracias.

ÍNDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT	3
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1 QUÉ ES LA PALEOCLIMATOLOGÍA	4
1.2 ÁREA DE ESTUDIO	6
1.3 CLIMATOLOGÍA	7
1.4 VEGETACIÓN	14
2. OBJETIVOS	16
3. MATERIAL Y MÉTODOS.....	17
3.1. INFORMACIÓN DENDROCRONOLÓGICA.....	17
a. Extracción de muestras de campo.....	17
b. Sincronización de muestras y medición de los anillos de crecimiento radial.....	19
c. Estandarización de las series de crecimiento y creación de la cronología.....	19
3.2 BASES DE DATOS CLIMÁTICOS	20
3.3 IDENTIFICACIÓN DE LAS RELACIONES CLIMA-CRECIMIENTO	22
3.4 RECONSTRUCCIÓN CLIMÁTICA.....	22
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	23
4.1 DESCRIPCIÓN DE LA CRONOLOGÍA.....	26
4.2 CORRELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS	28
4.3 CALIBRACIÓN-VERIFICACIÓN	32
4.4 RECONSTRUCCIÓN CLIMÁTICA	36
5. CONCLUSIONES	39
6. REFERENCIAS.....	40

RESUMEN

A partir de muestras de crecimiento radial de *Pinus halepensis* Mill extraídas en el Parque Natural de las Bardenas Reales de Navarra se ha reconstruido el SPI 12 de agosto desde 1840 a 2012. Esta variable ha ofrecido un elevado grado de correlación con la cronología, con valor de 0'79, algo inusual en la dendrocronología. Los periodos más secos aparecen en los años 1896, 1929 y 1943 y los más húmedos en los años 1848, 2004 y 2007. En cambio, la menor variabilidad de la precipitación se localiza en el tercio central del siglo XIX y en la primera mitad del XX. La reconstrucción nos aporta una señal climática de fondos de valle, no muy habituales en género de la dendroclimatología.

Palabras clave: *Pinus halepensis* Mill, Navarra, reconstrucción climática, dendrocronología, precipitación.

ABSTRACT

From samples of radial growth of *Pinus halepensis* Mill extracted from the Natural Park of Bardenas Reales de Navarra, an SPI has been reconstructed August 12 from 1840 to 2012. This variable has offered a high degree of correlation with the chronology, with a value of 0'79, something unusual in dendrochronology. The driest periods appear in the years 1896, 1929 and 1943 and the wettest in 1848, 2004 and 2007. On the other hand, the least variability in precipitation is located in the central third of the 19th century and in the first half of the 20th. The reconstruction gives us a climatic signal of valley bottoms, not very common in the genre of dendroclimatology.

Keywords: *Pinus halepensis* Mill, Navarra, climatic reconstruction, dendrochronology, precipitation.

1. INTRODUCCIÓN

La reconstrucción de variables climáticas en el pasado nos permite conocer cómo ha sido la evolución del clima en momentos en los que no había una intervención significativa del ser humano sobre el sistema climático. Este es uno de los aspectos más interesantes de la paleoclimatología, siendo la dendroclimatología una de sus herramientas más interesantes para la reconstrucción del clima del último milenio.

En este trabajo vamos a tratar de reconstruir, a partir de muestras de crecimiento radial de *Pinus halepensis* Mill del sector central de la Depresión del Ebro, la evolución de aquella o aquellas variables climáticas que más influencia, desde el punto de vista estadístico, tengan en su crecimiento secundario.

No se trata de una especie demasiado longeva, pero se conoce de la existencia de ejemplares que superan los 200 años, suficientes como para adentrarnos en momentos en los que no existían mediciones instrumentales en el caso de que sea posible desarrollar una reconstrucción.

1.2 QUÉ ES LA PALEOCLIMATOLOGÍA

En la (tabla.1) se muestran algunas de las fuentes de información sobre el clima del pasado más utilizadas por los paleoclimatólogos, los conocidos como *proxy data*. Todas ellas tienen en común que utilizan para la reconstrucción un argumento que es real, como es el de que las variaciones climáticas del pasado son capaces de dejar huellas en los elementos bióticos y abióticos de la superficie terrestre que en la actualidad pueden ser interpretadas en términos de clima, teniendo en cuenta el principio del actualismo. Como señala Saz (2003) “*La Paleoclimatología surge como ciencia encargada del estudio, reconstrucción e interpretación de los climas pasados, tratando de identificar las variaciones climáticas de media y baja frecuencia y sus tendencias naturales*”.

ORIGEN		FUENTE DE INFORMACIÓN
GEOLÓGICO	OCEÁNICO	Depósitos marinos
		Formas asociadas con cambio en el nivel del mar
	CONTINENTAL	Terrazas fluviales y paleosuelos
		Formas y depósitos glaciares y periglaciares
		Dinámicas de pendientes
		Depósitos eólicos
		Espeleotemas
		Travertinos
		Sedimentos de lagos
		Cores de hielo
BIOLÓGICO	OCEÁNICO	Sedimentos biogénicos (moluscos y diatomeas)
	CONTINENTAL	Anillos de crecimiento anual de los árboles
		Paleontología y arte rupestre
		Polen, esporas
		Restos de insectos
		Restos de moluscos
		Corales
HISTÓRICO	DOCUMENTAL	Observaciones y documentos históricos
		Registro históricos de fenómenos naturales
	INSTRUMENTAL	Observaciones históricas instrumentales

Tabla 1. Fuentes de información paleoclimática. (A partir de Saz, 2003)

La dendrocronología es, para los últimos siglos, uno de los métodos de reconstrucción que mejores resultados ofrece en latitudes templadas. Las reconstrucciones dendroclimáticas se basan en el principio del crecimiento radial de las leñosas está condicionado fundamentalmente por el clima. Esta condición llega hasta el punto de minimizar los efectos de otros parámetros que también tienen la capacidad de regular este crecimiento (Fritts, 1990).

Los árboles tienen dos tipos de crecimiento: en altura, o primario, y el radial, o secundario. Condicionado por un ciclo anual en el que podemos diferenciar dos periodos, el primero; vegetativo, en el que no se produce crecimiento, y el segundo; de latencia, en el que por la acción combinada de varios factores que influyen en la eficacia de la fotosíntesis y en la disponibilidad de materias elaboradas (Saz, 2003), el árbol genera en

torno al *cambium* células de floema (corteza) y xilema (madera), en un ciclo anual que comienza en primavera y finaliza en otoño.

Este anillo se forma pues en la estación activa (en los meses centrales del año, aunque con una duración variable), mientras que en invierno permanece inactivo (en la zona templada). Sin embargo, los factores ambientales que influyen al crecimiento se refieren, sobre todo, al clima; en situaciones de *stress* del árbol se retarda el crecimiento ya que tiene problemas para generar la madera. Este *stress* se produce por situaciones muy frías o estaciones muy secas (a pesar que el pino es una especie que se adapta muy bien a temperaturas adversas, sufre estas situaciones y tiene relevancia en la propia generación de anillos de crecimiento). En última instancia, este método se utiliza en zonas donde los contrastes estacionales son evidentes, es decir, zonas templadas.

1.2 ÁREA DE ESTUDIO

En relación con la reconstrucción de variables climáticas a partir de la dendrocronología en la Depresión del Ebro, se ha de tener en cuenta que se trata de un espacio que, durante milenios, se ha visto ampliamente transformado por la actividad antrópica. La agricultura y la ganadería han desplazado a las masas boscosas hacia las montañas que al norte (Pirineos) y al Sur (Sistema Ibérico) bordean la cuenca.

Es en estas zonas donde podemos encontrar ejemplares de varios siglos de antigüedad con los que recientemente se han hecho reconstrucciones de temperatura y precipitación (Oliva et al, 2018; Tejedor et al, 2017a; Tejedor et al, 2017b; Tejedor et al, 2016, Tejedor et al, 2019). Pero se trata de la reconstrucción de una señal de ámbitos de montaña, con una evolución del clima que puede ser diferente a la del sector central.

De hecho, las masas boscosas de *Pinus halepensis* pueden ofrecer una alternativa a esta situación. Si bien como hemos dicho no se trata en prácticamente ningún caso de ejemplares muy longevos, lo cierto es que estudios anteriores (Novak et al, 2013; De Luis et al, 2013) indican que son especialmente sensibles a la precipitación y, por tanto, potencialmente, puede ser un buen árbol para utilizarlo en la reconstrucción del clima.

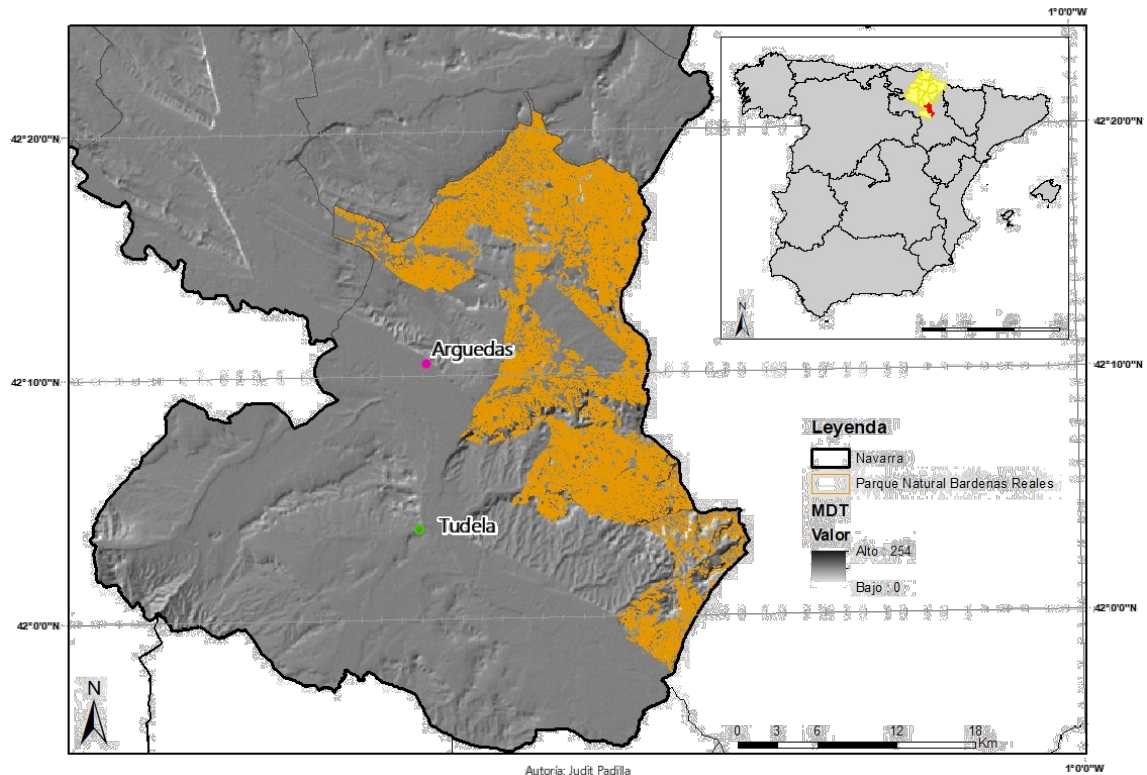


Figura 1. Mapa de localización: Elaboración propia. Fuente: <https://idena.navarra.es/Portal/Descargar>

Las masas forestales objeto de análisis en este trabajo se encuentran en Navarra, en el Parque Natural de las Bardenas Reales, en pleno sector central de la Depresión del Ebro (fig. 1). La altitud sobre el nivel del mar oscila entre los 280-660 m y el terreno se caracteriza por un sustrato sedimentario propio de la depresión del Ebro: materiales terciarios y cuaternarios blandos y poco resistentes a la erosión y muy sensibles a la erosión diferencial, responsable de algunas curiosas formas de modelado en la zona. Aunque en términos técnicos, nos referiríamos a suelos compuestos de caliza, arcilla y arenisca (Marín y Desir, 2010). En atención a las tormentas en esta zona, se comportan como un fenómeno curioso, ya que, debido al sustrato blando que se ha nombrado anteriormente, sumado con el agua torrencial, dan como resultado que “el suelo se desvanezca a tus pies”.

1.3 CLIMATOLOGÍA

En relación al clima, este es considerado como mediterráneo continental. Además de ello, y según la clasificación de Köppen, se encontraría dentro de los climas de tipo seco. En

concreto nos encontramos frente a un **BSK estepario frío** (fig. 2), un clima templado con precipitaciones escasas durante todo el año y con una temperatura media anual inferior a los 18°C.

Clasificación climática de Navarra y la zona de estudio según Köppen

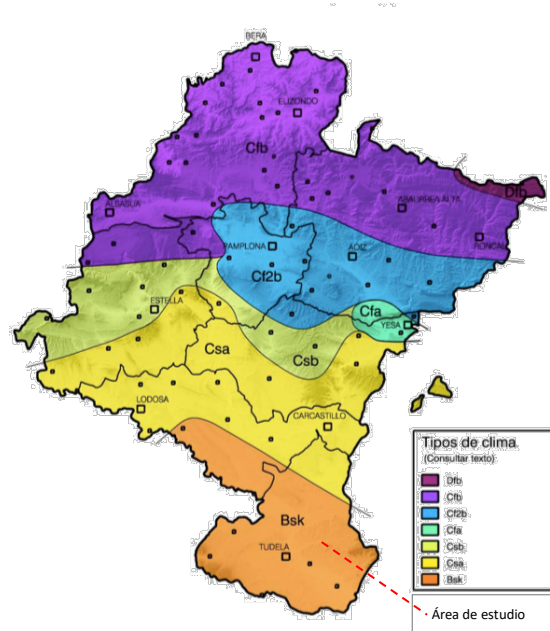


Figura 2. Clasificación climática de Navarra y la zona de estudio según Köppen. Departamento de Desarrollo Rural, Medio Ambiente y Administración Local. http://meteo.navarra.es/data/estudio_agroclimatico/koppen.pdf

Con ello hacemos referencia a una zona donde encontramos una severa escasez de precipitaciones, además de ser irregulares y en muchos casos, torrenciales, las temperaturas son elevadas en verano y frías en invierno. Estos altos contrastes, sumados con la acción del cierzo y la escasa vegetación, dan como resultado esos señalados relieves con formas tan peculiares a la vista humana.

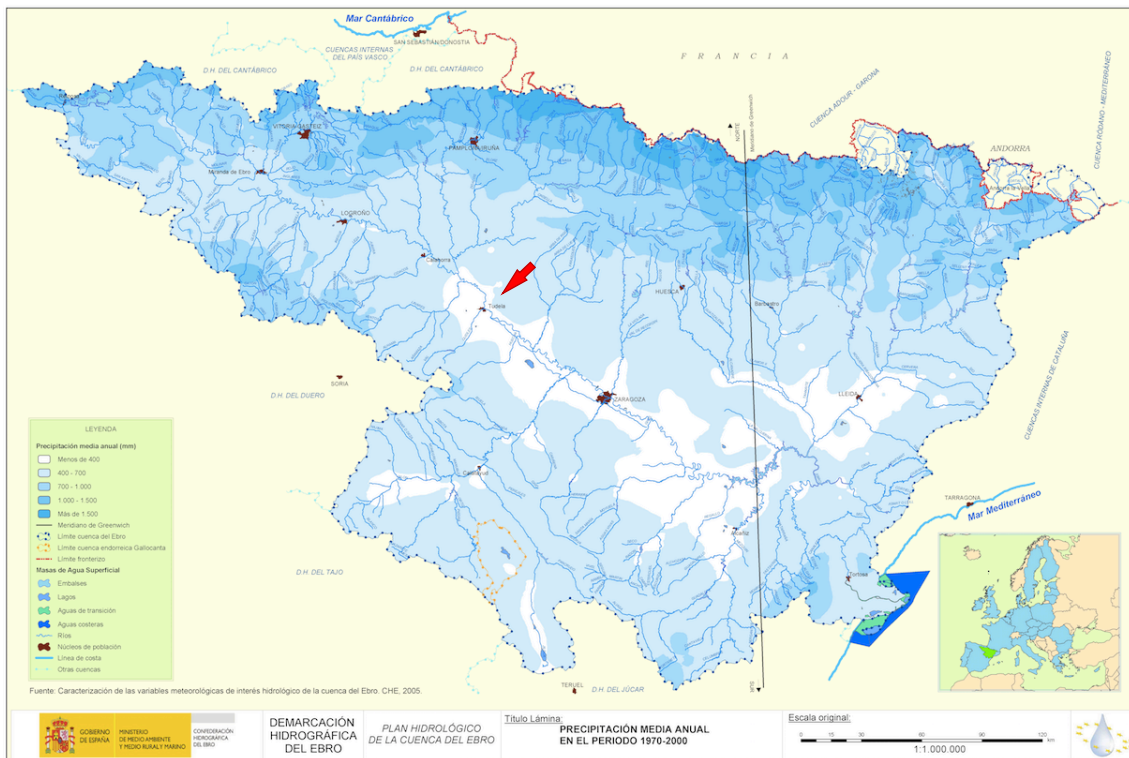


Figura 3: Mapa de precipitación CHE.

En efecto observamos un gradiente longitudinal Norte-sur de las precipitaciones, encontrando valores mas altos en el norte de la cuenca y más bajos en el sur. La depresión del Ebro, por el contrario, muestra unos valores bajos en cuanto a precipitaciones como se puede observar en la (fig.3), donde los colores blanquecinos predominan en las dos márgenes del río Ebro.

La distribución de las precipitaciones en la zona de estudio, –señalado con una flecha roja– (fig.3), muestra valores menores a 400mm y, en mayor extensión, entre 400 y 700mm anuales. Coincidente la menor precipitación con la mayor temperatura de más de 14°C de media anual, además de la segunda división de precipitación que se encuentra con valores de temperatura de 12-14°C de media (fig.4).

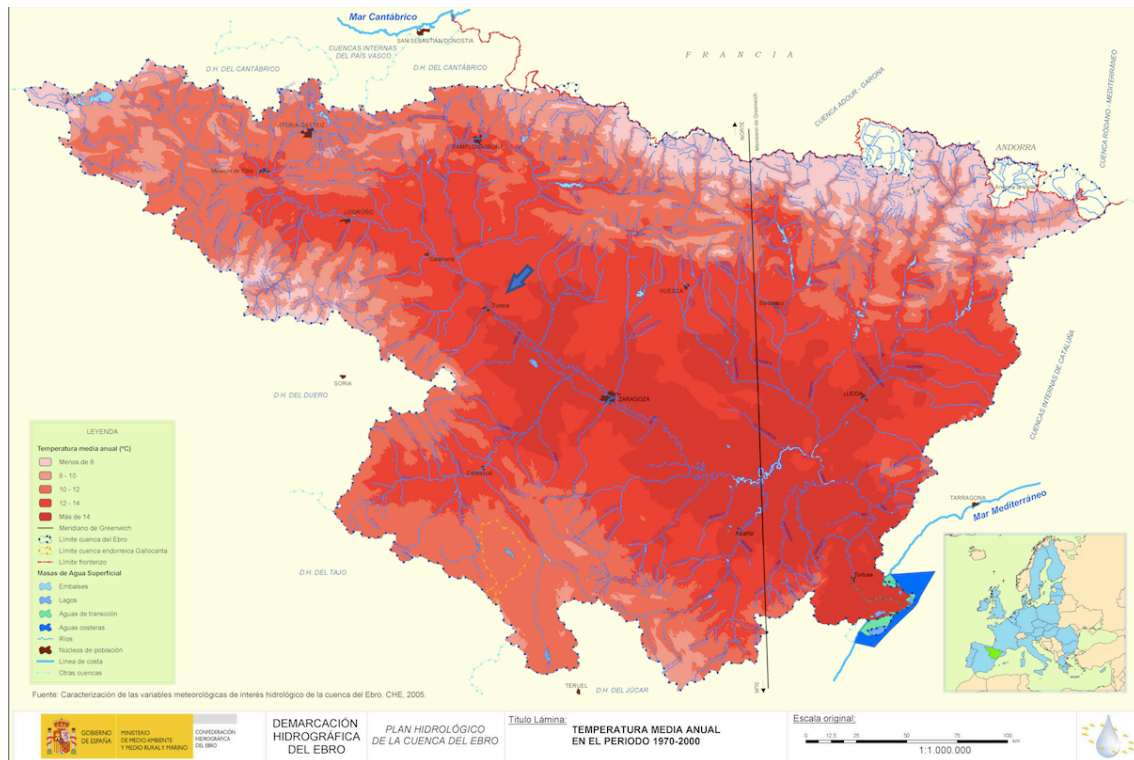


Figura 4: mapa de temperaturas CHE.

A continuación, la depresión del Ebro muestra unos valores elevados en la parte central y unos valores bajos tanto en la parte Norte como es en la parte sur de la cuenca. Es en la zona de estudio donde podemos observar máximos de temperatura proporcionado por el clima de estepa frío comentado anteriormente (fig.2).

En este sentido se comprende la información climática proporcionada de la página web <http://meteo.navarra.es/climatologia/graficosclima.cfm>, hemos podido extraer datos de temperaturas medias y precipitaciones, necesarios para la representación de dos climogramas en zonas cercanas a la zona de Bardenas Reales (fig.5).

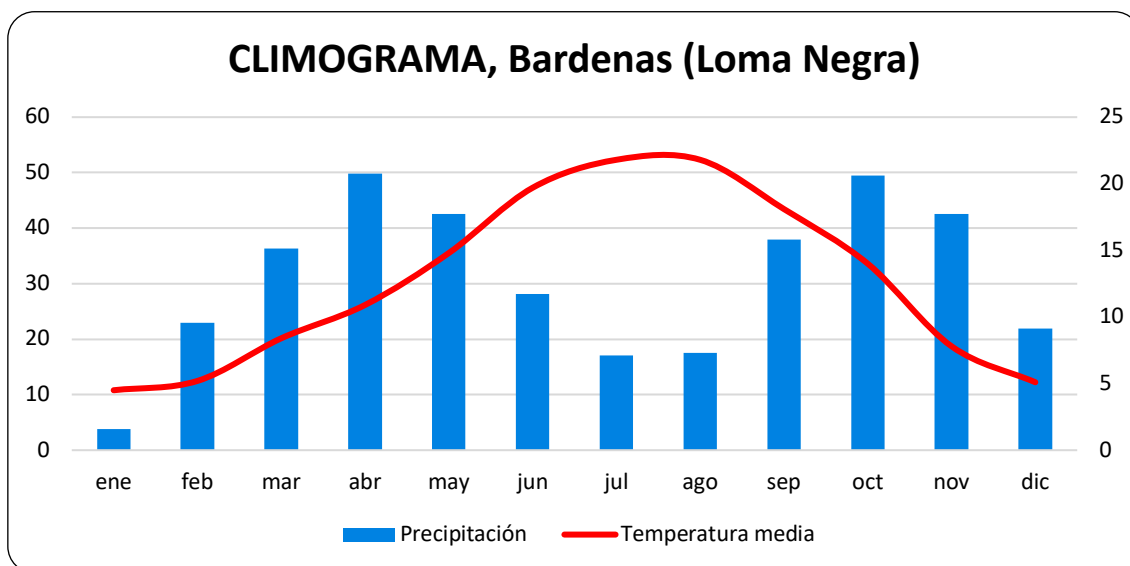


Figura 5: Climograma Loma Negra, <http://meteo.navarra.es/climatologia/graficosclima.cfm>, elaboración propia.

	Temperatura media	Precipitación
ene	4,5	3,8
feb	5,2	22,9
mar	8,4	36,3
abr	10,9	49,8
may	14,8	42,6
jun	19,7	28,1
jul	21,8	17,1
ago	21,8	17,5
sep	18,1	37,9
oct	14	49,5
nov	7,8	42,6
dic	5,1	21,9

Tabla 2: Datos climograma. Elaboración propia.

En la zona de Loma Negra podemos observar dos máximos de precipitación en los meses de abril y octubre con valor 49,8 y 49,5mm, además, dos aumentos de enero a abril y un descenso, seguido de otro aumento de precipitación de agosto a octubre con su respectivo descenso, por lo que podríamos decir que tiene dos estaciones lluviosas, una en primavera y otra en otoño. Una precipitación pues claramente equinoccial (Tabla, 2).

Por otro lado, las temperaturas siguen una distribución normal con el pico en verano, generando un estiaje en los meses de junio, julio, agosto y septiembre. Siguiendo la distribución normal de temperaturas en zonas templadas, cabe añadir su máximo en verano, en los meses entre junio y agosto, y sus mínimos en invierno con valores inferiores a los 5°C de media.

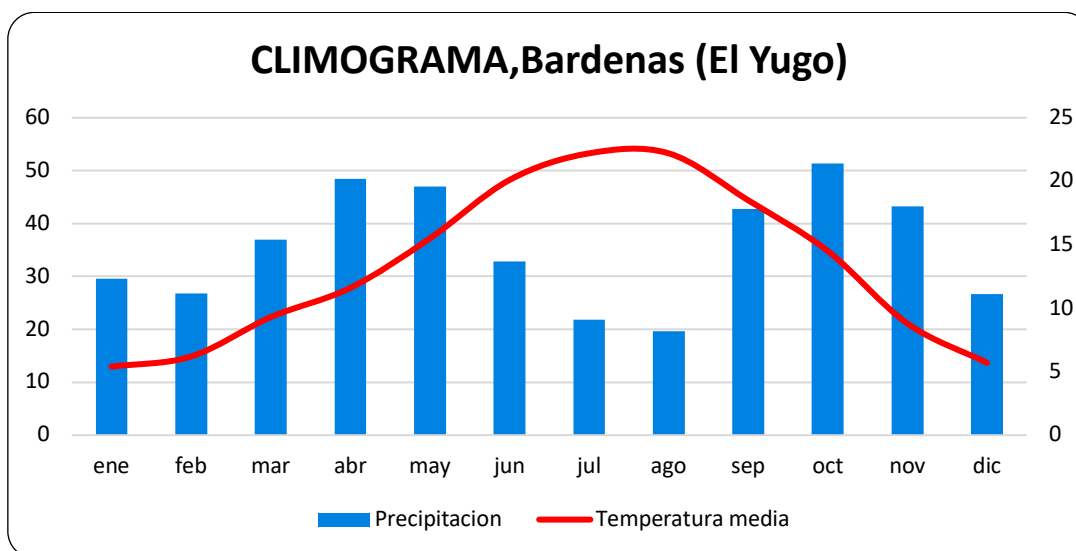


Figura 6: Climograma El Yugo, <http://meteo.navarra.es/climatologia/graficosclima.cfm>, elaboración propia.

Es cierto un aumento en El Yugo (fig.6) respecto a las precipitaciones comentadas en el climograma anterior, tenemos máximos en abril con valores de 48,5mm y en octubre – superando a la estación meteorológica anterior– de 51,4mm. Por otro lado, las temperaturas también superan a lo visto en el comentario anterior, con máximos de junio a agosto de alrededor de los 22°C (tabla 3). Su estiaje, en los meses de verano –junio, julio y agosto–, en este momento las temperaturas se encuentran por encima de las precipitaciones.

	Temperatura media	Precipitación
ene	5,4	29,6
feb	6,2	26,8
mar	9,3	36,9
abr	11,6	48,5
may	15,5	47
jun	20,1	32,9
jul	22,2	21,8
ago	22,2	19,7
sep	18,5	42,8
oct	14,5	51,4
nov	8,8	43,2
dic	5,7	26,7

Tabla 3: Datos climograma. Elaboración propia

La Depresión del Ebro es rica en materiales sedimentarios puesto que en el “cenozoico”, la cuenca fue rellena de depósitos sedimentarios. Estos materiales son materiales blandos, muy fácilmente erosionables con la acción del viento y del agua, formando relieves tabulares que acaban dejando en resalte por la erosión diferencial un tipo de formaciones denominadas cerros, anteceros, relieves acarcavados propios de Bardenas y gran parte de la depresión del Ebro, badlands...

En relación con este tema, se desarrollan procesos geomorfológicos relacionados directamente con el clima actual, como la termoclastia (Fig. 7) es producto de una repetición de ciclos de humectación-secado del suelo. En la humectación el suelo se vuelve barro y mojado, mientras que en el secado, el suelo se contrae para perder la humedad, con la repetición de estos ciclos se forman grietas y aperturas entre la cobertura del suelo formando estas costras en el terreno.

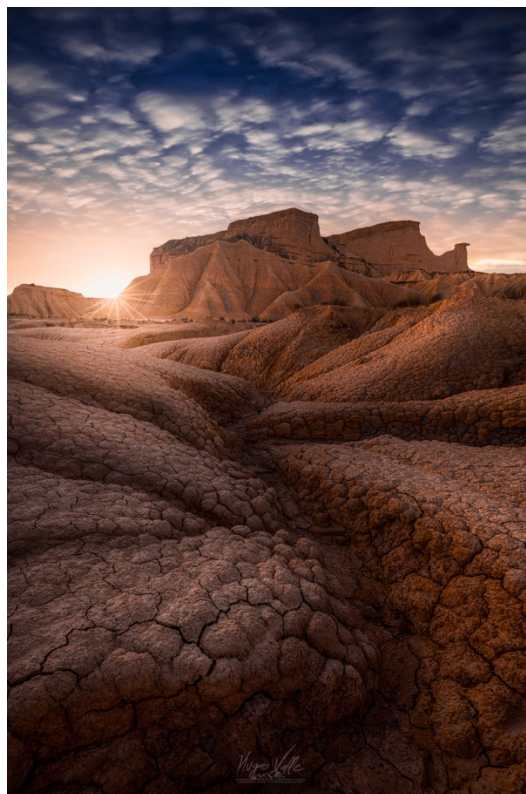


Figura 7: Desertic. Autor: Hugo Valle.

1.4 VEGETACIÓN

Nuestra zona de estudio tiene la vegetación típica de cualquiera con un clima mediterráneo Continentalizado como hemos comentado ya anteriormente. En estas condiciones las especies forestales son más bien escasas, si exceptuamos las presentes en los bosques de ribera, destacando el *Pinus halepensis*, muy resistente a la sequía, por ello resisten sin problemas los veranos secos y de crecimiento rápido. Por el contrario, el *P. halepensis* es la especie más afectada de manera directa con los incendios, además de ser una especie que favorece una rápida regeneración —a posteriori de un incendio—, como causa de la alta producción de sus conos serotinosos.

P. halepensis ha sido muy utilizada en la repoblación entre los años treinta y setenta del pasado siglo en zonas mediterráneas, con el objetivo de proteger el suelo y de actuar como “rompevientos” cerca de las costas. Ya se ha comentado lo blandos que son los materiales en la zona de estudio, por ello son necesarios para evitar una pérdida significativa de la cubierta del suelo. Esta especie alcanza alturas de entre 20 y 35 metros, y el diámetro del tronco oscila los 80/100 cm.

En cuanto a su hábitat y distribución, el *P. halepensis* se encuentra en altitudes más bien bajas, en la zona Mediterránea o piso Mesomediterráneo (fig. 8). El uso que se le da a esta especie no es la silvicultura comercial, debido a su tamaño y a la mala calidad de su madera. Pero si se utiliza para la industria de la celulosa y del papel como materia prima. Sin embargo, se encuentra ampliamente distribuido en la cuenca del Ebro (fig. 9).



Figura 8: Distribución Piha. Elaboración propia. Fuente EUFORGEN

En relación a la vegetación que presenta la zona, en base a la depresión del Ebro, encontramos matorrales esclerófilos, típicos de zonas secas como lo es el Parque, además de landas y matorral mesófilo, por último, destacan en un groso considerable las zonas agrícolas (Fig. 9).

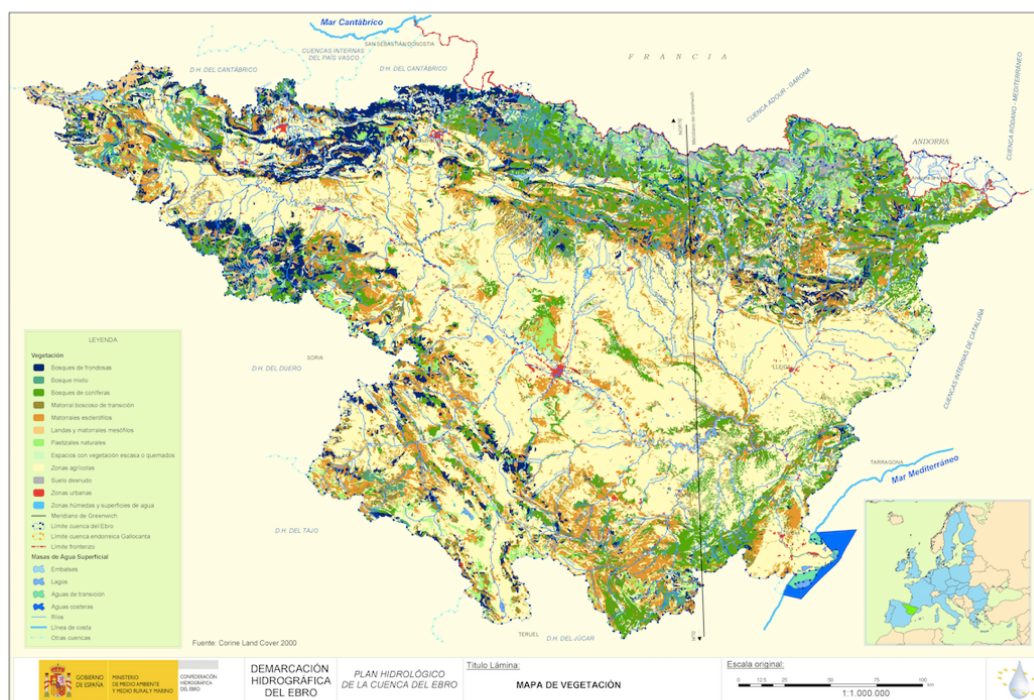


Figura 9: Mapa de vegetación cuenca hidrográfica del ebro. CHE.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal del trabajo es tratar de desarrollar una reconstrucción climática partir de muestras de crecimiento radial de *Pinus halepensis* extraídas en el Parque Natural de las Bardenas Reales de Navarra, en el sector central de la Depresión del Ebro.

Por ello es necesario cumplir una serie de objetivos:

- i) Crear una cronología a partir de las muestras extraídas de crecimiento radial en el campo y ya medidas por el Grupo de Clima, Agua, Cambio Global y Sistemas Naturales.
- ii) Analizar las relaciones existentes entre el crecimiento radial de esa masa forestal expresado en la cronología y el clima.
- iii) Identificada la variable climática que mejor correlaciona con el crecimiento, reconstruir esa variable tantos años como tenga la cronología disponible.
- iv) Describir la evolución temporal de la variable reconstruida.

3. MATERIAL Y MÉTODOS.

3.1. INFORMACIÓN DENDROCRONOLÓGICA

Los datos dendrocronológicos utilizados en este trabajo pertenecen al Grupo de Investigación de Clima, Agua, Cambio Global y Sistemas Naturales, cuyos investigadores desarrollaron el trabajo de campo y laboratorio necesarios para hacer la cronología.

a. Extracción de muestras de campo

Las muestras fueron extraídas, como ya hemos señalado, en el Parque Natural de las Bardenas Reales de Navarra en el mes de junio de 2013. Se recolectaron 61 muestras procedentes de 32 ejemplares de *P. halepensis*. Se trataba de ejemplares dominantes o codominantes, situados sobre suelos representativos de la zona analizada, lejos de fuentes de humedad o fondos de barranco y sin perturbaciones externas, como hongos o parásitos, significativas. Ha de decirse que todo el proceso metodológico que lleva a la obtención de unas cronologías con objetivos paleoclimáticos trata de eliminar todas aquellas señales que no sean climáticas. Árboles creciendo, por ejemplo, cerca de fuentes de humedad, podrían perder parte de la señal referida a las precipitaciones de la zona.

Las muestras se extraen con una barrena tipo Pressler de 40 cm y sección de 5 mm a, aproximadamente, 130 cm del suelo, altura en la que parece quedar bien reflejada toda la secuencia anual de anillos de crecimiento radial, y de forma paralela al tronco, tratando de alcanzar el centro (fig. 10). La barrena de Pressler es una herramienta habitual en trabajos forestales diseñada para extraer una muestra del árbol sin dañarlo o sin ser perjudicial. Este instrumento, tiene una parte afilada en un extremo, y en ese mismo extremo, unas roscas similares a las de un tornillo –esto nos permite “barrenar” el árbol y que se introduzca la barrena en él mientras gira–. A la hora de extraer muestras, se extraen dos de cada árbol, con el objetivo de poder visualizar todos los anillos (Stokes y Smiley, 1996).



Figura 10. Extracción de muestras de un ejemplar de *Pinus halepensis* del sector central del V. del Ebro. Elaboración propia.

El testigo o *core* extraído, es un cilindro de 5 mm de diámetro que se extiende desde la corteza del árbol (fig. 11) hasta el centro y una longitud variable, dependiendo el tipo de árbol a muestrear.

Durante el trabajo de campo, para diferenciar las muestras, se le asigna a cada testigo obtenido, unas siglas que indican el lugar dónde han sido tomadas las muestras, la especie y el nº de muestra representada.



Figura 11. Secuencia de anillos de crecimiento radial de un ejemplar de *P. halepensis* en el porta cores. Elaboración propia.

Una vez se llega al laboratorio, las muestras son pegadas en unos listones de madera donde se secarán entre 7 y 14 días, con ello reducimos el riesgo a que ésta se rompa. Posteriormente, estas muestras son lijadas con lijas de grano sucesivamente más fino, lo que nos permitirá identificar de una forma más eficiente los anillos de crecimiento en el proceso de medición (fig. 11).

b. Sincronización de muestras y medición de los anillos de crecimiento radial

La sincronización es un proceso fundamental dentro de todo el desarrollo metodológico de la dendrocronología. A cada anillo de cada muestra se le ha de asignar un año concreto, y correcto, de formación. Un solo fallo en esa sincronización invalida todo el proceso metodológico posterior.

Se trata así de un proceso largo y costoso en relación al tiempo que ha de emplearse en el laboratorio para sincronizar correctamente las muestras. Además *P. halepensis* es una especie en la que es habitual encontrar anillos dobles e incluso triples y anillos ausentes, es decir, años en los que se han podido generar más de un anillo según el primer caso o no generarse ninguno según el segundo (al menos en la zona en la que se ha extraído la muestra) lo que evidentemente complica el proceso.

Metodológicamente el proceso compara las muestras para realizar una adecuada sincronización y está asistido por un software específico denominado Tsap. Las mediciones se realizan en una mesa de medición tipo LinTAB (Rinn, 2011) de una precisión de 0,01 mm y la sincronización, tras el proceso de medición, es verificada con COFECHA (Holmes, 1983).

De las muestras analizadas la más longeva tenía 172 años y la edad media era de 84. Más de 10 series superaban los 100 años de edad.

c. Estandarización de las series de crecimiento y creación de la cronología

Para crear la cronología se utilizaron un total de 61 series. Para eliminar cualquier señal o tendencia existente en las series de crecimiento relacionada con la edad del árbol (señal

biológica) las series fueron sometidas por el equipo investigador del Grupo de Clima a un proceso de estandarización utilizando el package de R *dplR* (Bunn, 2008) con el que también se creó la cronología. Para asegurarse su validez se emplean una serie de estadísticos, como el Rbar o el EPS. Los valores obtenidos en ambos casos abundan en su calidad.

3.2 BASES DE DATOS CLIMÁTICOS.

La calidad de los datos existentes en el entorno y la longitud de las series disponibles no era la más adecuada para hacer una reconstrucción climática. Tradicionalmente en *dendro* se trabaja con datos de una estación climática cercana, con datos tomados en un termómetro y un pluviómetro que se encuentran en unas condiciones climáticas determinadas. A pesar de que este observatorio puede estar en una zona considerada como cercana, pero quizás no representativa del clima en el que están los árboles muestreados, por eso elegimos utilizar series en **GRID**, además, son series en las que está asegurada la calidad de información, ya que no existen ni lagunas en ellas, ni homogeneidades, ni datos aberrantes. Es por ello que para este trabajo hemos optado por series de datos climáticos procedentes de otras fuentes, como el Climate Research Unit (CRU, Harris et al., 2014) o la base de datos SPREAD (Serrano et al., 2017).

- Base de datos CRU Arguedas temperatura son los datos de (https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.04/ge/) se generó un grid de 0,5° de resolución para poder asignar a cada cuadrícula un valor tanto de temperatura como de precipitación. Con ello, obtenemos CRU Arguedas temp y CRU Arguedas pmm, estos datos se obtienen a partir de los datos de observatorios cercanos.
- Base de datos SPREAD (<http://spread.csic.es/>), trabaja con un grid de 5km, mayor extensión del terreno que la base CRU, pero tiene como diferencia fundamental que utiliza muchos más observatorios (>12.000) para el periodo 1951-2012. Éste goza de una resolución alta, las estimaciones de precipitación se calculan de forma independiente con modelos lineales para cada día y punto de la cuadrícula, utilizando las observaciones más cercanas y las covariables geográficas en lugar de modelos globales, haciendo hincapié en el carácter local de la precipitación.

Tradicionalmente en dendro se correlacionaba con datos mensuales directamente, ni siquiera los estacionales, esto se hacía hace 25 años. Actualmente no solo se correlaciona con los datos estacionales y anual, sino también con índices de precipitación como el SPI o SPEI. Ambos índices son datos sintéticos que se refieren a series acumuladas de precipitación a distintos intervalos temporales.

Con estas dos bases de datos obtenemos todos los datos en crudo, pero, para trabajar necesitamos convertir estos datos en índices de precipitación. La finalidad de utilizar índices es que, a diferencia de los datos mensuales, éstos acumulan los datos. De una forma más simple, podríamos decir que necesitamos estas agrupaciones de datos para analizar mejor las variables, ya que el dato anual va de enero a diciembre, pero, el año hidrológico lo hace desde septiembre hasta agosto del siguiente año, por lo que puede tener una mayor influencia y, mejor aún, responde bien a las lluvias de primavera que afectan al crecimiento del pino.

En resumen, los índices de precipitación tanto SPI como SPEI son datos que hacen referencia a series acumuladas de precipitación a distintos intervalos temporales, es decir, acumulaciones de precipitación mensuales.

- **Índice de datos SPI** se reconoce como el índice de precipitación estandarizado, que analiza las precipitaciones en datos mensuales y en series acumuladas de precipitación entre 2 y 72 meses, que da lugar a las condiciones de sequía.

Aunque es una base de datos completa y, por tanto, fiable, presenta un problema estadístico, ya que las series pluviométricas no siguen una distribución normal, por lo que varían en el conjunto de datos.

Las ventajas de SPI, i) mide la severidad de las sequías de acuerdo a su intensidad y duración. ii) permite comparar la severidad de las sequías a lo largo del tiempo y del espacio. iii) permite identificar el principio y el final de los periodos secos.

- **Índice de datos SPEI** se reconoce a diferencia de SPI, ésta por el índice de precipitación y evapotranspiración, ya que analiza precipitación y temperatura en datos mensuales.

La relación entre los dos índices de datos principales, SPI y SPEI, es un índice que señala cómo son los valores, si se tratan de valores secos, húmedos, si son valores normales en los rangos... en relación a toda la serie de datos obtenida.

3.3 IDENTIFICACIÓN DE LAS RELACIONES CLIMA-CRECIMIENTO

El siguiente paso es el de analizar las relaciones que hay entre las variables climáticas consideradas (datos de temperatura y precipitación mensual y estacional, así como los valores a distintas escalas temporales de los índices de sequía SPI y SPEI). Para ello buscaremos relaciones lineales a través del coeficiente R de Pearson.

Este coeficiente de correlación es una medida de la relación lineal entre variables aleatorias que expresan cualidades, es decir, variables cualitativas; en este caso las cronologías y los datos climatológicos.

De este modo se garantiza que un valor de correlación de Pearson mayor, quiere determinar que el grado de relación entre las variables clima-crecimiento es más elevado y por tanto su dependencia una de otra, si bien en ellos siempre hay que considerar factores biológicos para su explicación. De este modo se puede comprobar cuál es la variable climática que tiene una incidencia directa con el crecimiento del anillo del *P. halepensis*, como hemos comentado en apartados anteriores. Y también, se pueden establecer cuáles son los meses más sensibles para el crecimiento del árbol en función de las variables climáticas estudiadas.

3.4 RECONSTRUCCIÓN CLIMÁTICA

Cuando nos referimos a una reconstrucción climática, no es más que obtener y conocer cómo era el clima en el pasado a través de algún tipo de proceso biótico o abiótico que pueda estar intervenido por el clima, como es el caso del *Pinus halepensis*.

En nuestro caso esto será posible tras identificar cuál es la variable climática que correlaciona de una manera más eficiente con el crecimiento radial del árbol, es decir, que mejor explica o condiciona el crecimiento de una masa forestal de esa especie en esa zona. Seguido del proceso de calibración-verificación y haber realizado estudios matemáticos para poder reconstruir el clima, objetivo principal del trabajo, a través de buscar la forma en la cual esté mejor relacionado el crecimiento del árbol con una variable climática ($\text{Crecimiento} = f(\text{Clima})$).

Más profundamente, el método de calibración y verificación, ha sido utilizado en el transcurso del trabajo como un elemento indispensable para la obtención de la

reconstrucción climática, ya que todos los trabajos científicos –como es el caso–, necesitan ser comprobados y verificados antes de lanzar los resultados. Sin embargo, para comprobar si se puede realizar esta reconstrucción años atrás con datos climáticos (índices de precipitación, concretamente) que desconocemos, para verificar si este análisis matemático es real y, por tanto, el resultado es correcto, se divide en dos periodos la reconstrucción calculada; i) Con el primer periodo reconstruyo el siguiente y, ii) con el segundo periodo reconstruyo también los datos que faltan del anterior, obteniendo la totalidad de datos. Finalmente represento y veo que el resultado que da son correlaciones significativas y elevadas.

Para la realización de la reconstrucción es necesario un análisis de regresión lineal entre las dos variables que en el paso anterior ya hemos calibrado y verificado, siendo la variable independiente (x) –la cronología–, y la variable dependiente (y) el clima –índice de precipitación–. De allí se obtiene la ecuación de la recta que aplicaremos para reconstruir las sequías del periodo (1842-1950) de los datos climáticos que desconocemos.

Por otro lado, para estudiar la consistencia de los modelos se realizan las pruebas estadísticas del coeficiente de determinación (R^2), éste prueba la proporción de variación de los datos de precipitación con respecto a la línea de tendencia lineal y determina la calidad del modelo para replicar los resultados. Dicho de otro modo, indica lo bien que los datos se ajustan al modelo estadístico.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En primer lugar y a modo resumen, comentar la presencia de distintas bases de datos y variables climáticas a analizar, tanto de temperatura como de precipitación, como ya se ha comentado a lo largo del trabajo. Además de ello, la existencia de índices climáticos que se componen de acumulados de precipitaciones. De esta manera y gracias al cálculo estadístico de **R de Pearson**, hemos obtenido distintos valores de R, en los que había que buscar el valor más alto, es decir, el valor que mejor correlaciona las variables analizadas.

A la hora de correlacionar las variables, se trataba de la cronología de la masa forestal del *Pinus halepensis*, junto con datos de precipitación o temperatura en un periodo de 63 años, y por otro, índices SPI y SPEI, también relacionados con la cronología.

Es como resultado de análisis final el obtenido en el SPI 12 de agosto de precipitación con el valor de correlación mayor (0,79). Con ello obtuvimos una variable para realizar la reconstrucción climática, SPI12 de agosto con un valor R extraordinario, significa que casi toda la variabilidad del crecimiento radial de estos árboles viene condicionada por la precipitación de esos 12 meses acumulados.

Tenemos las series de crecimiento radial de *Pinus halepensis* extraídas en el Parque Natural de Bardenas, muy cerca de la localidad de Arguedas. Con esas series de crecimiento, una vez medidas y estandarizadas por el grupo de investigación de Clima, Agua, Cambio Global y Sistemas Naturales, se hizo una cronología, que se trata de una serie representativa del crecimiento radial del *Piha* en Bardenas, y posiblemente en todo el sector central del valle del Ebro.

En la cronología lo que tenemos son índices de crecimiento, mostrando qué años ha crecido más y qué años ha crecido menos esa masa forestal.

De manera significativa, el crecimiento de un árbol puede estar influido por diferentes factores que no tengan que ver con el clima. Por ejemplo, que esté localizado en el fondo de un barranco, sobre más o menos cantidad de suelo, que haya paso de ganado cerca, alguna acequia al lado, que le hayan afectado plagas, etc. Si cogemos una gran cantidad de árboles es porque lo que intentamos es “*aislar*” la señal climática, incluso en el campo, se seleccionan, se intentan escoger aquellos que, aparentemente no tengan interferencias externas y estén sobre un suelo más pobre.

Con la ayuda de Google Earth se han extraído los datos climáticos de la base de datos CRU, las siguientes capturas muestran las diferentes cuadrículas de la toma de datos.

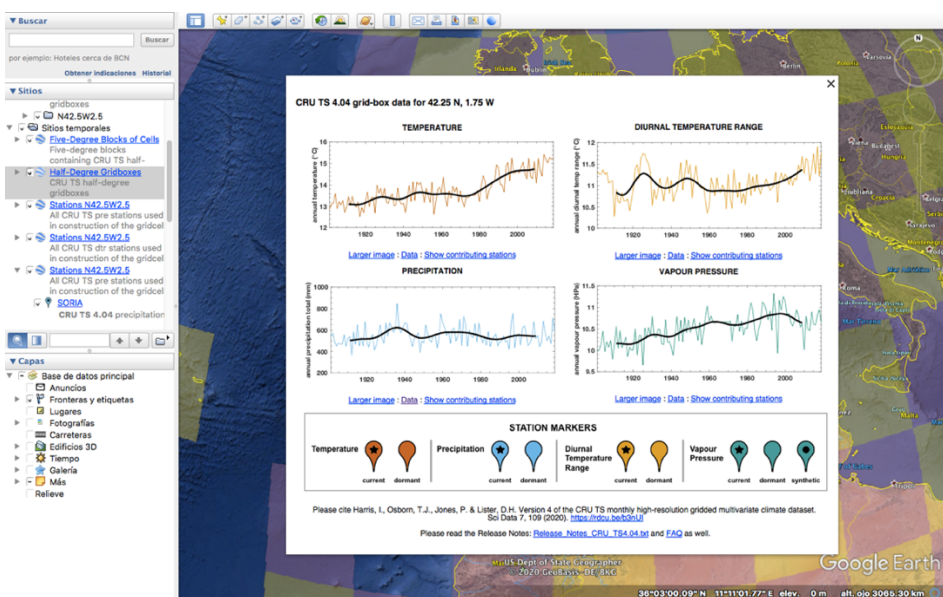
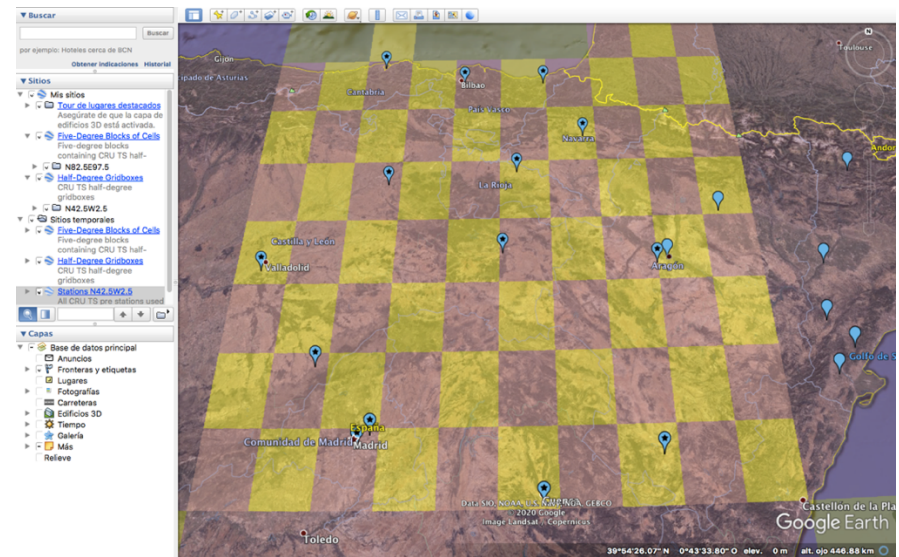
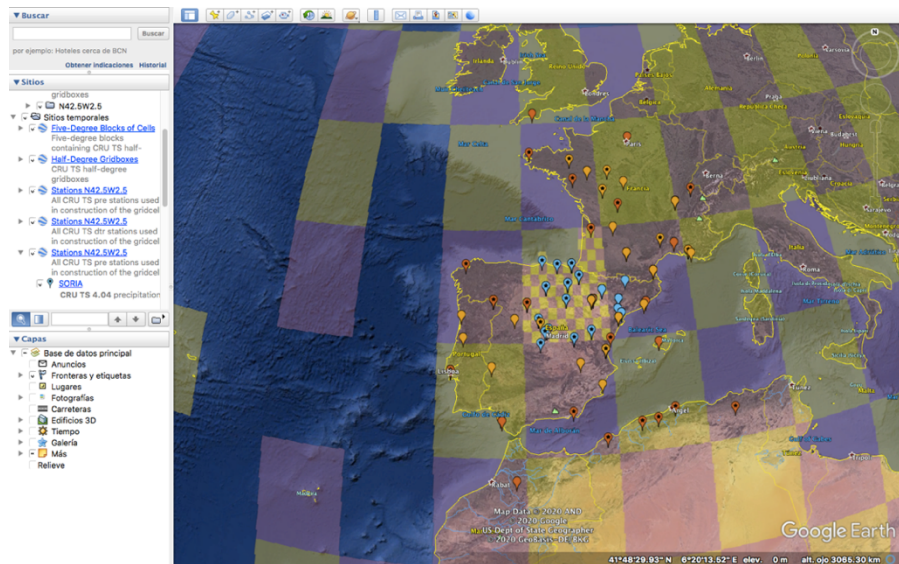


Figura 12a, 12b, 12c: Base de datos CRU. Fuente: Google Earth.

Los diferentes puntos (fig. 12c) de hace referencia a los distintos observatorios. Con rojo los datos de temperatura (los observatorios que tienen una estrella son activos actualmente), color azul datos de precipitación, color naranja hace referencia a rango de temperatura diurna y en verde datos de presión de vapor (estos no aparecen representados en la zona).

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA CRONOLOGÍA

Una cronología, como hemos señalado, es una serie temporal representativa del crecimiento radial de una masa forestal determinada. Todo el proceso metodológico que lleva a la obtención de esta serie trata de eliminar cualquier señal que no sea climática.

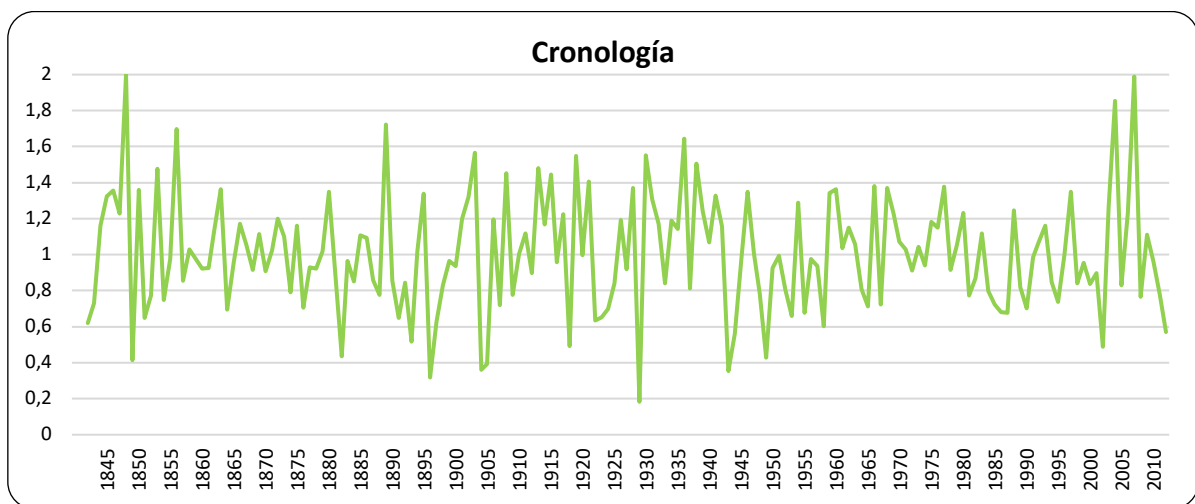


Figura 13: Cronología *Pinus halepensis* Bardenas Reales, Navarra. Elaboración propia.

La fig.13 muestra la cronología del *Pinus halepensis* en un rango temporal de 172 años, éste se corresponde con el periodo es 1842-2012 y se configura como elemento fundamental a la hora de reconstruir el clima del pasado de esa zona. La cronología podemos dividirla en dos periodos, los valores más elevados se concentran en los primeros años de la cronología. Esto se repite en el periodo final, sin embargo, los valores más bajos se concentran en la parte central de la cronología, en concreto entre los años 1900-1945.

Los valores máximos, podemos encontrarlos en los datos correspondientes (tabla. 4) a los años 1848, 1889, 2004 y 2007 son los que concentran mayor índice de crecimiento.

1848	1889	2004	2007
2,0003	1,7211	1,8546	1,9886

Tabla 4: Años con mayor crecimiento. Elaboración propia.

De manera alterna, (tabla 5), los muestra los valores con menor índice, que coinciden con los años 1849, 1896, 1929 y 1943. Dos de esos años corresponden con el periodo comentado anteriormente.

1849	1896	1929	1943
0,4138	0,3189	0,1829	0,3529

Tabla 5: Años con menor crecimiento. Elaboración propia.

Sin embargo, el periodo que más variabilidad de crecimiento tiene está entre los años 1900-1940 y esto se repite a partir del año 2000. Grosso modo, el periodo de 1860-1875 es el periodo con menor variabilidad de crecimiento.

4.2 CORRELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS

A la hora de decidir con qué variable se va a realizar la reconstrucción, es necesario hacer una serie de análisis matemáticos, por lo que es necesario calcular el valor R de Pearson para calcular qué variable climática correlaciona mejor con la cronología del *Pinus halepensis*.

Temperatura_CRU	
MES	Valor de R
ENE	0,1775
FEB	0,0840
MAR	-0,0941
ABR	0,1305
MAY	-0,1369
JUN	-0,0171
JUL	-0,1555
AGO	-0,1448
SEP	0,0258
OCT	-0,0068
NOV	-0,1114
DIC	-0,1604
pcpINV	0,1940
pcpPrim	-0,0621
pcpVera	-0,1235
pcpOtoñ	-0,0470
anual	-0,0635

Tabla 6: Correlación entre los valores mensuales de temperatura de la base de datos del CRU (extraídos en Arguedas) y la cronología. Elaboración propia

Esta temperatura nos da unos valores de correlación bajos, por lo que hay poca influencia por parte de las temperaturas, con otras palabras, el crecimiento de los árboles no está influenciado por las temperaturas.

Como se ha venido diciendo, el árbol comienza a crecer en primavera. Es más, hasta junio es cuando realmente genera más madera en el anillo. Podemos observar el valor de R como dominante con 0'366, asimismo, viendo el valor de la R podemos inferir que, primaveras lluviosas favorecen el crecimiento del árbol.

El valor de R más alto, al igual que en el caso anterior se encuentra en la precipitación de primavera, con valor de 0'496, por tanto, llegamos a la misma conclusión que en el caso anterior, y es que las lluvias de primavera favorecen el crecimiento del árbol.

Ahora nos planteamos una distinción entre ambas bases de datos. ¿por qué es mucho mayor la R con la base SPREAD que con la base CRU?, realmente son los mismos árboles, pero varía la escala, y es que CRU tiene un carácter más regional y SPREAD, más local. Con ello encontramos datos climáticos distintos, y esto tiene que ver con la resolución, interfiriendo en la calidad de los datos de manera directa, como se ve en los resultados de R.

Correlación CRU_pmm	
MES	Valor de R
ENE	0,1113
FEB	0,2561
MAR	0,3293
ABR	0,1763
MAY	0,1768
JUN	0,0723
JUL	0,0968
AGO	0,1851
SEP	0,0377
OCT	-0,0677
NOV	-0,0686
DIC	-0,0858
pcpINV	0,2620
pcpPrim	0,3661
pcpVera	0,1787
pcpOtoñ	-0,0620
anual	0,2972

Tabla 7: Correlación entre los valores mensuales de precipitación de la base de datos del CRU (extraídos en Arguedas) y la cronología. Elaboración propia.

Correlación SPREAD_pmm	
Mes	Valor de R
ENE	0,1052
FEB	0,2949
MAR	0,3768
ABR	0,3423
MAY	0,1817
JUN	0,0506
JUL	0,1025
AGO	0,1986
SEP	0,2316
OCT	-0,0464
NOV	-0,0232
DIC	-0,1225
pcpINV	0,3277
pcpPrim	0,4966
pcpVera	0,1543
pcpOtoñ	0,0784
P_pri y ver	0,4789
anual	0,4503

Tabla 8: Correlación entre los valores mensuales de precipitación de la base de datos SPREAD (extraídos en Arguedas) y la cronología. Elaboración propia

Resultados índices SPI, SPEI R		
Correlacion SPI SPREAD		
SPI_12_AGO	Valor de R	0,794419
Correlacion SPI CRU		
SPI_12_AGO	Valor de R	0,6736086
Correlacion SPEI CRU		
SPEI_9_MAYO	Valor de R	0,5417187

Tabla 9: Valores de correlación más elevados entre los valores del SPI y SPEI de la base de datos SPREAD (extraídos en Arguedas) y la cronología. Elaboración propia.

En relación a la (tabla 9), la correlación SPI_SPREAD: La relación de 12 meses acumulados antes de agosto, da como resultado septiembre del año anterior, casi correspondiente con el año hidrológico. Con esta variable se va a realizar la reconstrucción, con un valor de R muy elevado. Significa, como ya hemos dicho, que casi toda la variabilidad de crecimiento radial de esos árboles viene condicionada por las precipitaciones acumuladas de esos 12 meses.

A la hora de trabajar con los datos y, en concreto, realizar análisis matemáticos como la ecuación de la recta –análisis de regresión lineal–, análisis de correlación, R de Pearson, etc., es preciso que las variables sean normales y, en el caso de no serlo, éstas deben ser normalizables por métodos como raíz cuadrada o logaritmo.

Ya que la muestra de datos climáticos son 62, es necesario el cálculo de la normalidad por el método de χ^2 (tabla 10)

	A
N	62
Shapiro-Wilk W	0,9867
p(normal)	0,7421
Jarque-Bera JB	0,805
p(normal)	0,6686
p(Monte Carlo)	0,615
χ^2	2,6452
p(normal)	0,10387
χ^2 OK (N>20)	YES

Tabla 10: Test de Normalidad. Past. Elaboración propia.

La p(normal) de χ^2 da un valor de $0,1038 > 0,05$, por tanto, la variable dependiente (y) es normal, esto quiere decir que podemos trabajar con estos datos estadísticos.

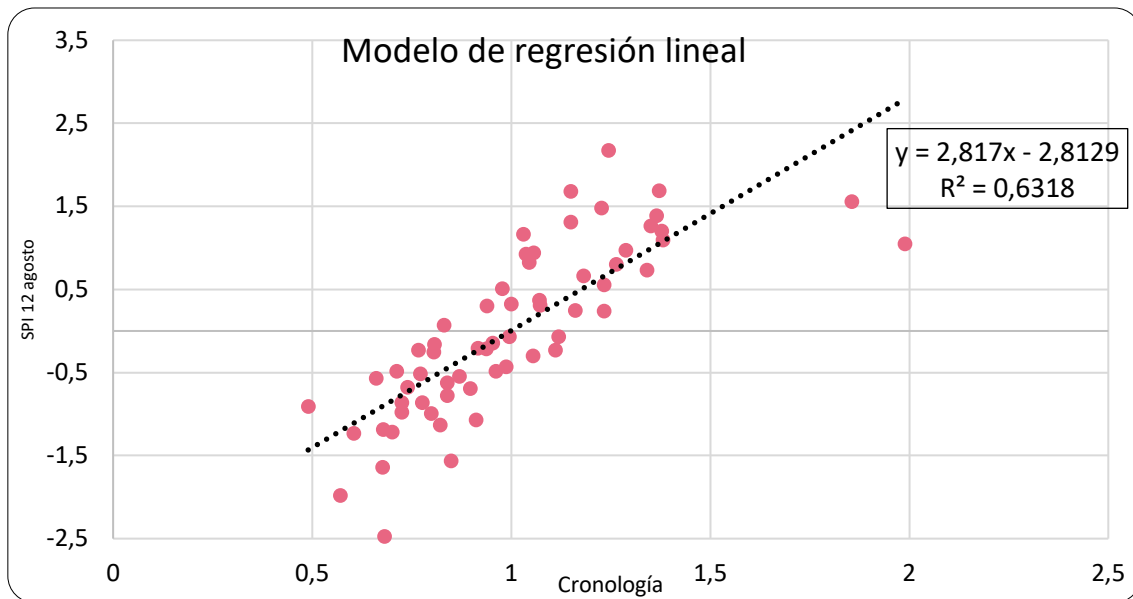


Figura 14: Modelo de regresión lineal. Elaboración propia.

Con los datos de SPI12 de agosto y la cronología, obtenemos el modelo de regresión lineal con su ecuación de la recta ($y=2,817x - 2,8129$) y su valor de R^2 (0,6318) (fig. 14).

4.3 CALIBRACIÓN-VERIFICACIÓN

En la fase de calibración y verificación se relacionan los datos de la variable que mejor correlaciona con la cronología, es decir, el SPI_12 de agosto correlacionado con los datos de la masa forestal en dos periodos diferenciados en 30 años.

El periodo de **calibración** correspondiente con el periodo (1981-2012) (fig.15), tras representar los valores, obtenemos la ecuación de la recta ($y= 2,468x - 2,7326$), con valor de R de 0,7972 y valor de R^2 de 0,6356, lo cual, quiere decir que el 63% de la variabilidad de la precipitación para el periodo de calibración.

Tras la fase de calibración, se realiza la fase de **verificación** en el mismo periodo temporal, (fig. 16), para este proceso se utilizan los valores de SPI_12 agosto, dónde, a raíz de la ecuación de la recta que hemos obtenido en el periodo de calificación visto anteriormente y, despejando la ecuación, –dando como valor (x), los datos de la cronología–, obtenemos el valor (y), a la ecuación y así obtener los datos para verificar el análisis. Una vez resuelta la ecuación para la secuencia de datos, vamos a representar en el eje (x) SPI_12 agosto estimado, en el eje (y), SPI_12 agosto original. Asimismo, analizamos la correlación de las variables representadas donde obtenemos un valor de R^2

de 0,781, un valor excepcional hablando de datos dendroclimáticos, esto explica un 78% de variabilidad, en la precipitación para el periodo de verificación.

Seguidamente, el periodo de **calibración** correspondiente al periodo (1951-1980) (fig. 17), tras representar los valores correspondientes con el eje (x), correlación de la masa forestal y eje (y), SPI_12 agosto, obtenemos la ecuación de la recta ($y = 3,1983x - 2,9331$), con valor de R de 0,8473 y valor de R^2 de 0,718 que explica que el 71% de la variabilidad de la precipitación, en el periodo de calibración.

Tras la fase de calibración, al igual que en el apartado anterior, se realiza la fase de **verificación**. Véase (fig. 18), se utilizan los valores del SPI_12 agosto, realizando la misma secuencia que para el apartado anterior –en este caso, el periodo temporal cambia en el rango de años (1951-1980)–. La representación de los datos corresponde como en el apartado anterior, en el eje (x) SPI_12 agosto estimado, en el eje (y) los datos correspondientes con el SPI_12 agosto original. Grosso modo, analizaremos la correlación entre las variables, dando un valor de R^2 de 0,6356, esto nos da como resultado un 63% de variabilidad en la precipitación, para el periodo de la verificación.

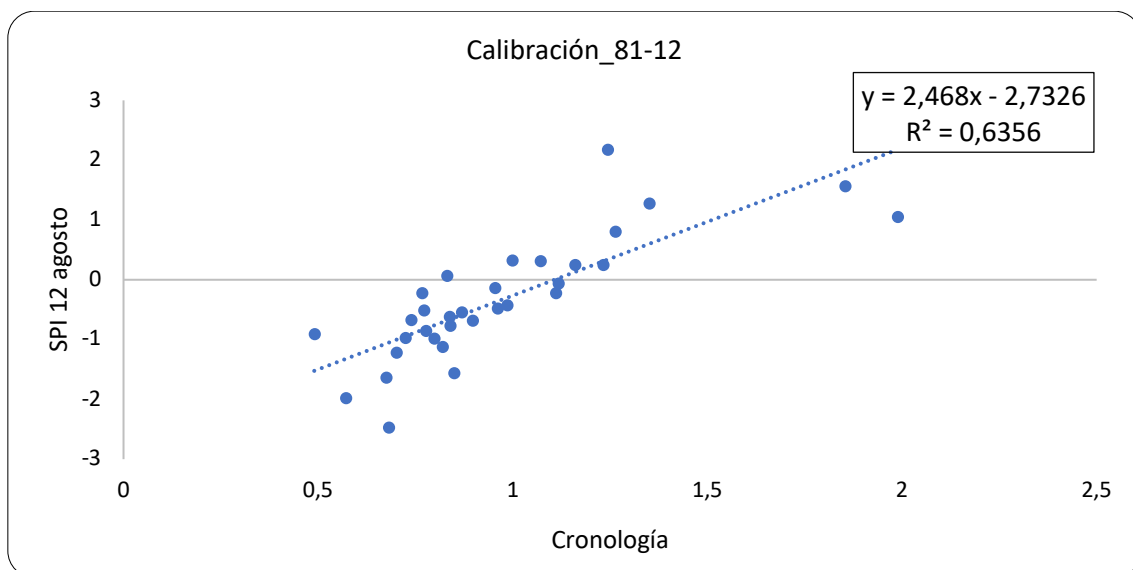


Figura 15: Calibración para el periodo 1981-2012. Elaboración propia.

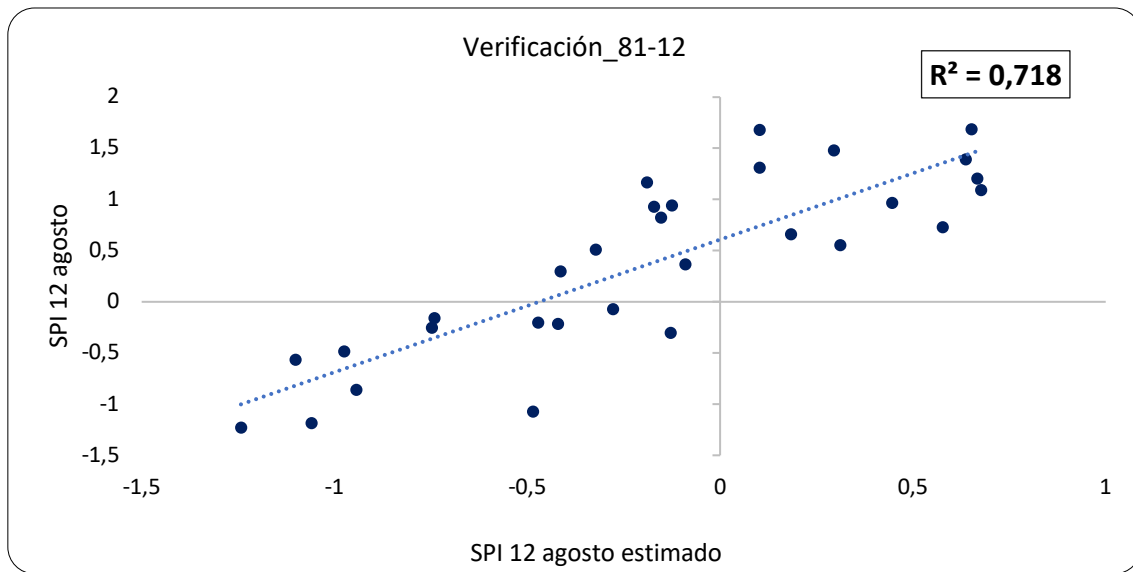


Figura 16: Verificación para el periodo 1981-2012. Elaboración propia.

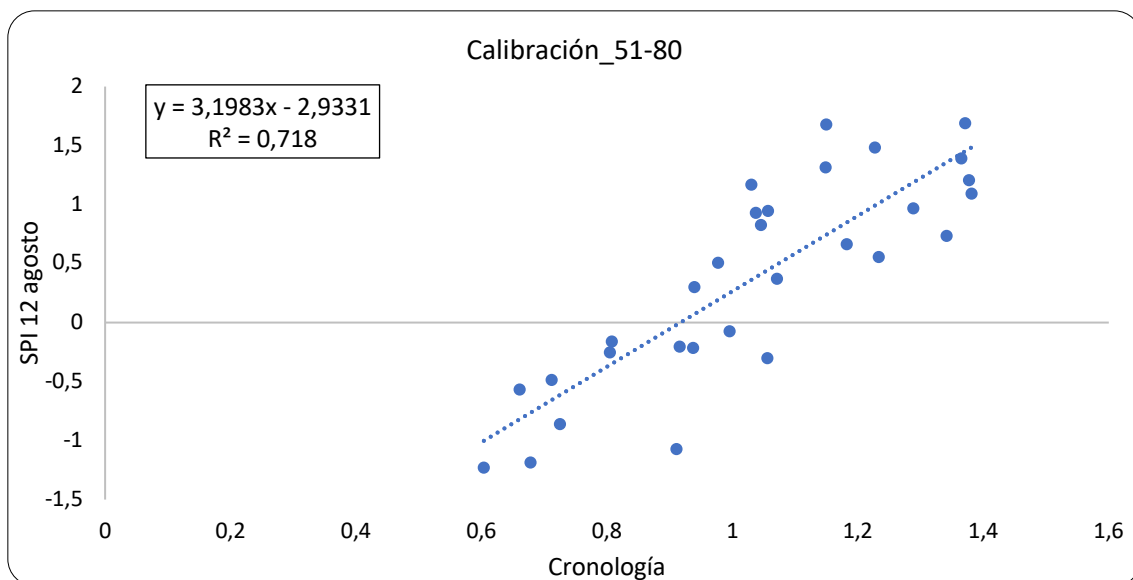


Figura 17: Calibración para el periodo 1951-1980. Elaboración propia.

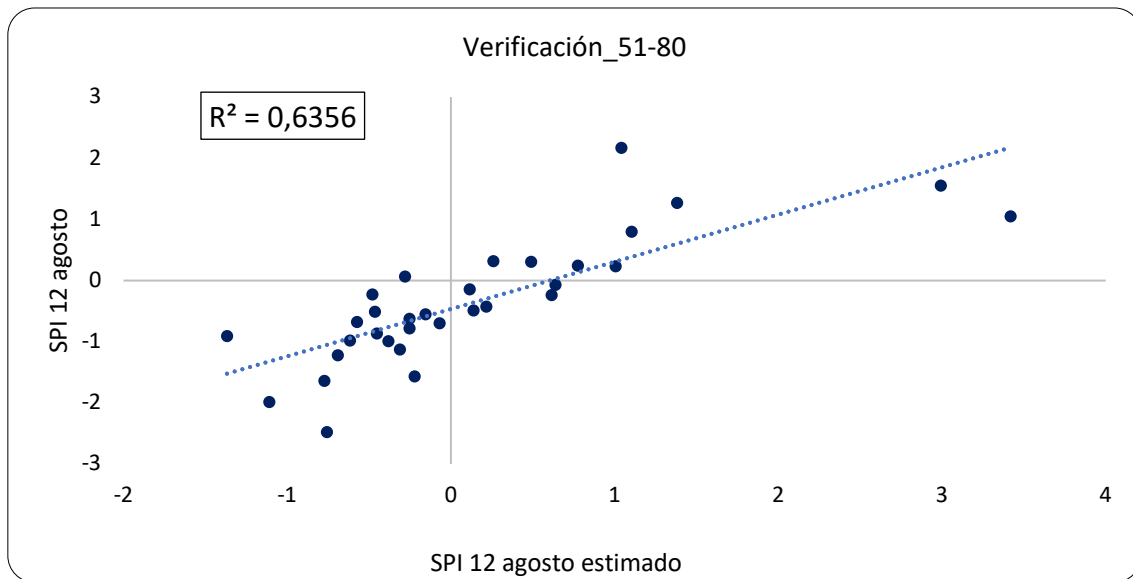


Figura 18: Verificación para el periodo 1951-1980. Elaboración propia.

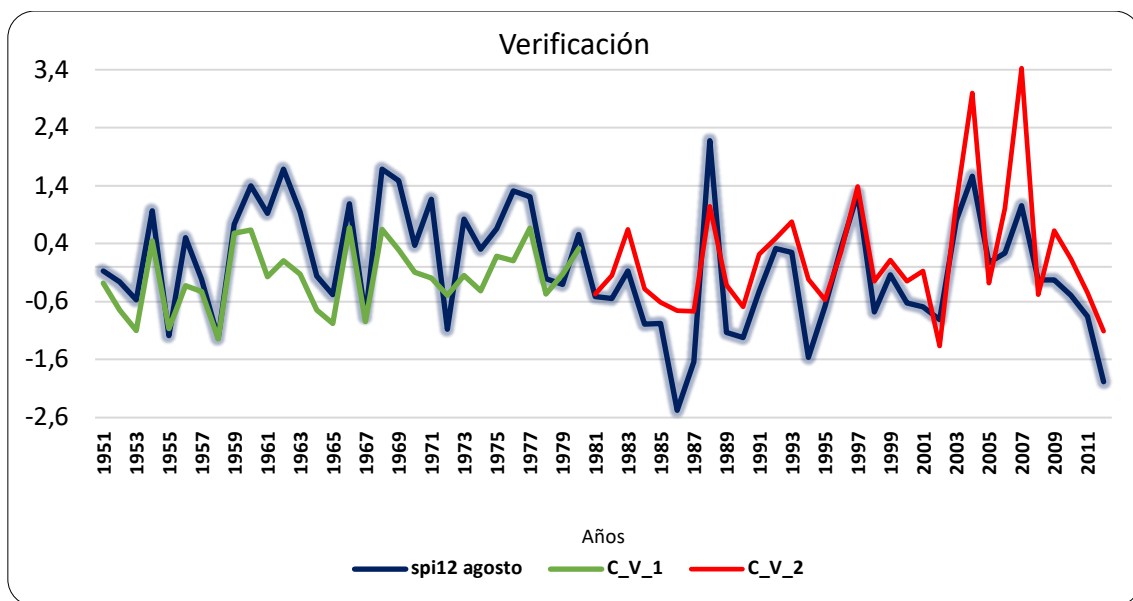


Figura 19. Representación verificación por periodos. Elaboración propia.

La (fig. 19) representada, muestra la variación lineal entre los distintos datos que hemos analizado. Los datos originales de SPI_12 agosto, representados en color azul oscuro, y contrastados, además, con los datos de color rojo, correspondiente con el segundo periodo de verificación (51-12), y los datos en color verde, correspondiente con el primer periodo de verificación (51-80). Se pueden observar similitudes en los datos. Y es que los datos verificados siguen la tendencia de los originales, correspondiéndose los años húmedos con picos ascendentes y los años secos con picos descendentes. Por lo cual, podemos

decir que el modelo matemático calculado cumple las expectativas y funciona para estos datos climáticos analizados con la cronología del *Piha*.

4.4 RECONSTRUCCIÓN CLIMÁTICA

Al finalizar el proceso de calibración-verificación, que nos permite comprobar que el modelo es adecuado para la reconstrucción, volveremos a un proceso similar a lo anterior, y es aplicar a esa ecuación y, sustituyendo la variable (x) por el dato de la cronología y la variable (y) resultante es el SPI_12 agosto de cada año, tantos años como tiene la cronología de datos de la masa forestal. Y obtenemos la reconstrucción climática con la variable que mayor favorece a la correlación, como es el caso del índice de precipitación en el acumulado 12 del mes de agosto. Es con este costoso proceso que podemos reconstruir, gracias a una variable viva como es el *Pinus halepensis*, nos permite conocer cómo fue el clima en el pasado, –en este caso hasta el año 1840–.

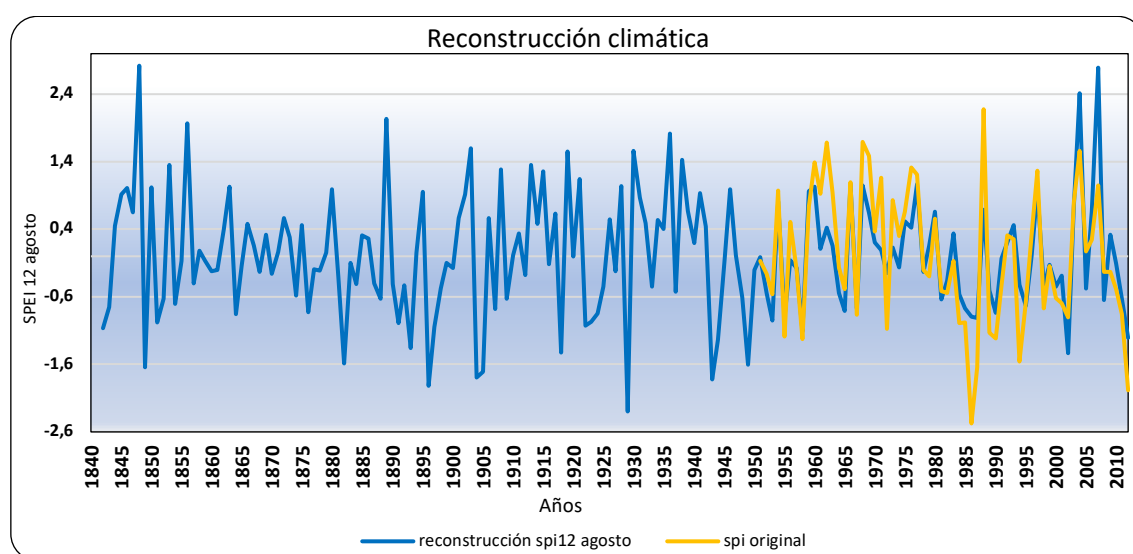


Figura 20: Reconstrucción climática. Elaboración propia.

La reconstrucción climática de sequías la obtenemos en base a los índices que nos da la cronología del crecimiento radial del árbol que, como se ha comentado en otros apartados, el *Pinus halepensis* genera anualmente dos anillos de crecimiento, –madera temprana y madera tardía– la suma de ambas, da como resultado el anillo anual (fig.20). Dependiendo

de si un año ha sido más seco o más húmedo podemos relacionarlo de una manera directamente proporcional con su crecimiento.

Asimismo, podemos diferenciar dos periodos, los periodos húmedos –éstos se corresponden con los valores más elevados de la reconstrucción–, representados (Tabla 11), vemos que los años más húmedos son 1848, con valor máximo correspondiente a la cifra de 2,82 2004 con valor de 2,41 y el año 2007 con valor de 1,78.

1848	2004	2007
2,82	2,41	2,79

Tabla 11. Valores máximos de la reconstrucción. Elaboración propia.

Por el contrario, los periodos secos, se corresponden con momentos de sequías, con valores, en este caso, de números negativos. La (Tabla. 12), nos representa tres de estos valores que destacan sobre la reconstrucción.

1896	1929	1943
-1,91	-2,30	-1,82

Tabla 12. Valores mínimos de la reconstrucción. Elaboración propia.

El año 1929 nos da el valor más bajo de la serie dendrocronológica con un valor de -2,30, seguido del año 1896 y 1943 en 3^{er} lugar.

Volviendo al análisis de la (Tabla 7), podemos observar que la representación del SPI_original, ésta exagera los datos comparados con los que da la reconstrucción –esto es debido a que los datos reconstruidos siempre quedan en cifras más “suaves” a los datos originales–, asimismo, la varianza de la reconstrucción queda reflejada frente a los datos reales.

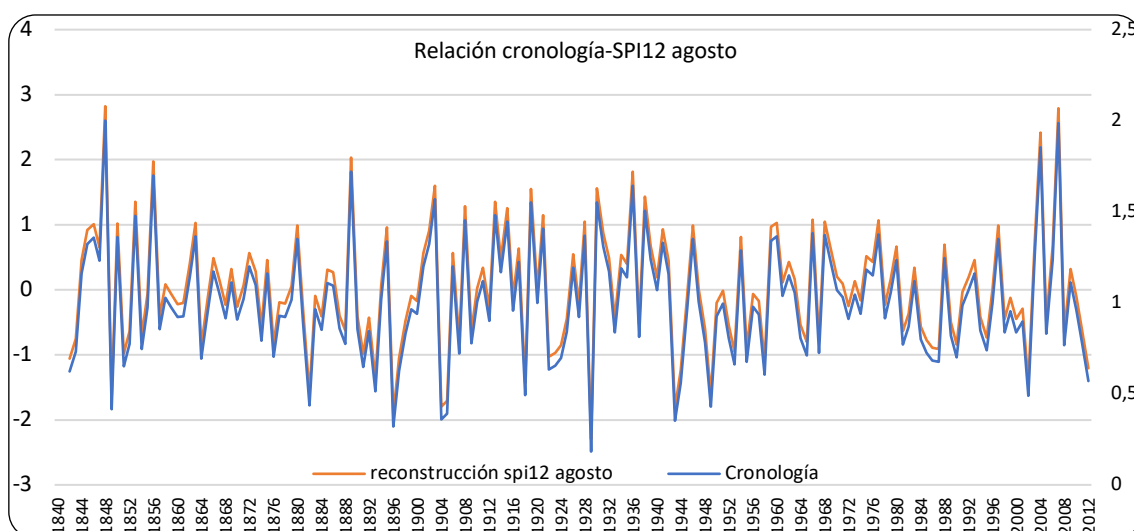


Figura. 21. Relación cronología con SPI_12 agosto. Elaboración propia.

Con el objetivo de poder observar si el índice de crecimiento del árbol se relaciona con la reconstrucción climática, es necesario realizar un gráfico para poder observar de manera visual si en el momento en el que hay un pico en el índice de crecimiento, éste se produce también en el índice de precipitación acumulado. Y a simple vista se puede observar que las dos variables son prácticamente un sombreado la una de la otra, ya que años húmedos según los datos reconstruidos, son años en los que el árbol ha crecido de una forma más pronunciada (fig.21). Y con ello observamos las redundancias entre las tablas 4, 5, 11 y 12 significativamente.

En resumen, podemos decir que la cronología del pino da como resultado la reconstrucción del SPI_12 de agosto a diferente escala, ya que coinciden casi en totalidad.

5. CONCLUSIONES

En primer lugar, podemos señalar que los valores de correlación más elevados con la cronología los encontramos con las series de índices de precipitación calculadas desde la base de datos SPREAD. Los valores de correlación entre la cronología y los datos del CRU son más bajos, lo que podría explicarse por el carácter más local de la primera en relación con los observatorios utilizados para su construcción.

La correlación más alta es de 0,79 y la encontramos con el SPI12 de agosto (base de datos SPREAD). Se trata de un valor de correlación extraordinario en el contexto de la reconstrucción dendroclimática que viene a señalar que una elevada parte de la variabilidad de los crecimientos de *Pinus halepensis* en la zona de estudio están condicionados por la suma de la precipitación de septiembre del año anterior al crecimiento hasta agosto del año del crecimiento, prácticamente el año hidrológico. Y, por otro lado, derivado de lo anterior, cabe destacar la elevada dependencia de esta especie de los valores de precipitación, con la trascendencia que este hecho podría tener en escenarios futuros de menor precipitación.

La serie reconstruida muestra una alternancia habitual de años y periodos secos con otros más húmedos, si bien destaca la menor variabilidad de la precipitación que se produce en el tercio central del siglo XIX y en las primeras décadas del XX, frente a la elevada variabilidad de las décadas posteriores.

Por último, comentar la importancia de este tipo de reconstrucciones, basadas en conocer el clima del pasado mediante la ausencia de datos climáticos (en este caso, ausencia de datos de precipitación desde el año 1950 hacia atrás en el tiempo, llegando hasta 1840 gracias a la cronología extraída de una variable viva como el caso del pino).

6. REFERENCIAS

- Barranco Mozos, P. (2017). *Reconstrucción de variables climáticas en el sector oriental de la Cordillera Ibérica mediante técnicas dendrocronológicas*. Trabajo de Fin de Grado. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza. 43 pp.
- Bunn, A.G., (2008). A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26, 115–124.
- Centro de Descargas del CNIG (IGN). (2020). Fecha de consulta 10 julio 2020, obtenido de:
<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=CAANE#>
- Climatología - Meteo Navarra. (2020). Fecha de consulta 18 julio 2020, obtenido de:
<http://meteo.navarra.es/climatologia/>
- CRU TS v. 4.04 Google Earth Interface. (2020). Fecha de consulta 3 agosto 2020, obtenido de: https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.04/ge/
- Cruellas García, I. (2017). *Análisis dendroecológico de dos repoblaciones de Pinus sylvestris y Pinus nigra en la depresión media intrapirenaica (Araguás del Solano, Huesca)*. Trabajo de Fin de Grado. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza. 38 pp.
- Daily precipitation of Spain. (2020). Fecha de consulta 22 julio 2020, obtenido de:
<http://spread.csic.es/>
- de Luis, M., Čufar, K., di Filippo, A, Novak, K., Papadopoulos, A., Piovesan, G., Rathgeber, C. B.K., Raventós, J., Saz, M.A. & Smith, K.T. (2013). Plasticity in Dendroclimatic Response across the Distribution Range of Aleppo Pine (*Pinus halepensis*). *Plos ONE* 8(12)
- El Medio Físico y Geología - Bardenas Reales. (2020). Fecha de consulta 16 julio 2020, obtenido de: <https://bardenasreales.es/medio-fisico-geologia/>
- Fritts, H.C., Guiot, J., Gordon, G.A., Schweingruber, F., (1990). Methods of Calibration, Verification, and Reconstruction BT - *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*, in: Cook, E.R., Kairiukstis, L.A. (Eds.), . Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 163–217.

- García Laín, I. (2017). *Dendroecología de Pinus Pinea en el Parque Nacional de Doñana. Crecimiento secundario y clima*. Trabajo de Fin de Grado. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza. 43 pp.
- GeoPortal Sitebro. (2020). Fecha de consulta 12 agosto 2020, obtenido de: <http://iber.chebro.es/geoportall/>
- Harris, I., Jones, P.D., Osborn, T.J., Lister, D.H., (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *Int. J. Climatol.* 34, 623–642.
- IDENA. (2020). Fecha de consulta 11 julio 2020, obtenido de: <https://idena.navarra.es/Portal/Descargar>
- Marín, C. y Desir, G. (2009): Caracterización de la erosión en áreas acarcavadas de la FM. Tudela (Bardenas Reales, Navarra). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 35 (2). pp 195-213.
- Novak, K., Saz Sánchez, M.A., Čufar, K., Raventós, J. & de Luis, M. (2013). Age, climate and intra-annual density fluctuations in *Pinus halepensis* in Spain. *IAWA Journal* 34: 459–474.
- Oliva, M.; Ruiz-Fernández, J.; Barriendos, M.; Benito, G.; Cuadrat, J.M.; Domínguez-Castro, F.; García-Ruiz, J.M.; Giralt, S.; Gómez-Ortiz, A.; Hernández, A.; López-Costas, O.; López-Moreno, J.I.; López-Sáez, J.A.; Martínez-Cortizas, A.; Moreno, A.; Prohom, M.; Saz, M.A.; Serrano, E.; Tejedor, E.; Trigo, R.; Valero-Garcés, B.; Vicente-Serrano, S.M. (2018). The Little Ice Age in Iberian mountains. *EARTH-SCIENCE REVIEWS*. 117. p.p.
- Rinn, F., (2011). TSAP-Win. *Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications*. User Ref. 110.
- Saz, M.A. (2003). *Temperaturas y precipitaciones en la mitad norte de España desde el siglo XV. Estudio dendroclimático*. Tesis doctoral de la universidad de Zaragoza. Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón. Serie investigación. 293 pp.
- Secretariat. (2020). *Pinus halepensis* - EUFORGEN European forest genetic resources programme. Fecha de consulta 3 agosto 2020, obtenido de: <http://www.euforgen.org/species/pinus-halepensis/>

- Serrano-Notivoli, R., Beguería, S., Saz Sánchez, M.A., Longares Aladrén, L.A., de Luis, M., 2017. SPREAD: A high-resolution daily gridded precipitation dataset for Spain. *Earth Syst. Sci. Data Discuss* 1–33.
- Stokes, M. & Smiley, T. (1996). *An introduction to tree-ring dating*. University of Arizona Press, Tucson.
- Tejedor, E., Ángel Saz, M., María, J.C., Esper, J., Martín, L.D., (2017a). Temperature variability in the Iberian Range since 1602 inferred from tree-ring records. *Clim. Past* 13.
- Tejedor, E., de Luis, M., Barriendos, M., Cuadrat, J.M., Luterbacher, J., Saz, M.Á., (2019). Rogation ceremonies: a key to understanding past drought variability in northeastern Spain since 1650. *Clim. Past* 15, 1647–1664.
- Tejedor, E., de Luis, M., Cuadrat, J.M., Esper, J., Saz, M.Á., (2016). Tree-ring-based drought reconstruction in the Iberian Range (east of Spain) since 1694. *Int. J. Biometeorol.* 60.
- Tejedor, E., Saz, M.A., Esper, J., Cuadrat, J.M., de Luis, M., (2017b). Summer drought reconstruction in northeastern Spain inferred from a tree ring latewood network since 1734. *Geophys. Res. Lett.* 44.